



طراحی کنترلر فازی مرتبه بالا برای سیستم تهویه مطبوع

محمد رضا سلطانیپور^{۱*}، علی اکبر قره ویسی^۲ و امیر حسین بیهقی^۳

^۱ استادیار، دانشکده برق، دانشگاه هوایی شهید ستاری، تهران

^۲ استادیار، دانشکده فنی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد گرمسار

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۵/۰۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۲/۰۸/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۲/۲۵

چکیده

این مقاله به بررسی عملکرد کنترل کننده فازی مرتبه بالا بر روی یک سیستم تهویه مطبوع می‌پردازد. اساس کار بر تنظیم اولیه هر متغیر با روش ممدانی و سپس بهره گیری از کنترل کننده فازی مرتبه بالا در تنظیم بهره کنترلی استوار می باشد. کنترل کننده فازی مرتبه بالا در طول فرایند کنترل، بهره‌های کنترلی را به گونه‌ای تغییر می‌دهد که خطا را به سمت صفر همگرا نماید. استفاده از کنترل کننده فازی مرتبه بالا، کنترل کننده را تبدیل به کنترل فازی تطبیقی نموده و باعث کاهش تعداد قواعد موجود در پایگاه قواعد موتور استنتاج کنترل-کننده فازی می‌گردد. در نتیجه حجم محاسبات ورودی کنترل کاهش می‌یابد. در ادامه برای بهینه نمودن کنترل پیشنهادی، از روش اتوماتای یادگیری گسسته استفاده شده است. کنترل کننده پیشنهادی قادر است در مواجهه با اغتشاش ایجاد شده در بار گرمایی و رطوبتی، شرایط مطلوب را در حداقل زمان ممکن فراهم نماید. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که این کنترل کننده قادر است شرایط مطلوب محیطی را از نظر دمایی و همچنین از نظر رطوبتی در کمترین زمان ممکن تأمین نماید که این مهم منجر به کاهش مصرف انرژی خواهد شد.

کلمات کلیدی: تهویه مطبوع؛ منطق فازی؛ کنترلر فازی مرتبه بالا و اتوماتای یادگیری تقویتی گسسته.

Design of high order fuzzy controller for HVAC systems

M.R. Soltanpour^{1,*}, A.A. Gharaveisi² and A.H. Beihaghi³

¹ Assoc. Prof., Elec. Eng., Shahid Sattari University, Tehran, Iran

² Assoc. Prof., Elec. Eng., Shahid Bahonar University, Kerman, Iran

³ M.Sc. Student, Elec. Eng., Islamic Azad University, Garmsar, Iran

Abstract

This paper investigates the performance of high-order fuzzy controller for Heating, Ventilating and Air Conditioning (HVAC) systems. This work is based on initial setting of each variable with mamdany method and then benefit of high-order fuzzy controller to regulate the gain control. In the control process, the high-order fuzzy controller make the changes in gains, so that the error can converge to zero by using this method. The controller as work as a fuzzy adaptive controller and reduction of the number of available rules in fuzzy controller inference engine rule base. Thus the computational complexity is reduced in controller input. Then to optimize the proposed control, we used discrete action reinforcement learning automata. The recommended controller is able to provide the desired conditions in the shortest possible time when facing a disturbance in the thermal and moisture load. The simulation results show that, this controller is able to provide the desired conditions in regards to temperature and humidity in the shortest possible time that it will result the reduction of energy consumption.

Keywords: Heating ventilating and air conditioning system; Fuzzy logic; High order fuzzy controller; Discrete action reinforcement learning automata.

۱- مقدمه

امروزه تحقیقات گسترده‌ای در زمینه کاهش مصرف انرژی صورت می‌پذیرد. یکی از سیستم‌هایی که مصرف انرژی آن قابل توجه می‌باشد سیستم تهویه مطبوع است. مصرف انرژی در این سیستم در بخش صنعت و در بخش ساختمان‌های تجاری، ۵۰٪ از مصرف انرژی در کل جهان را به خود اختصاص داده است [۱ و ۲]. با توجه به اینکه این سیستم از نوع چند متغیره، غیر خطی و غیر مینیمم فاز است، تنظیم آن بوسیله کنترل کننده‌های ابتدایی بسیار مشکل می‌باشد [۳]. از طرفی تنظیم نامناسب آن باعث اتلاف انرژی، عدم آسایش ساکنان و استهلاک بیش از حد عملگرها می‌شود [۴].

در گذشته برای کنترل این سیستم از کنترل کننده‌های روشن-خاموش (ترموستات) استفاده می‌گردید، زیرا تنظیم آسان و ارزان از ویژگی‌های این کنترل کننده‌ها است [۵]. اما عدم توانایی این کنترل کننده‌ها در کاهش مصرف انرژی و همچنین دقت پایین آنها باعث شد تا جای خود را به کنترل کننده‌های PID بدهند. کنترل کننده‌های PID در مقایسه با کنترل کننده روشن-خاموش از دقت بالاتری برخوردار هستند [۶ و ۷].

برای تنظیم دقیق کنترل کننده PID، دسترسی به مدل دقیق سیستم ضروری است. اما با توجه به عملکرد غیر خطی و عدم مدل سازی بعضی عناصر سیستم و به دلیل عدم شناخت صحیح، دسترسی به مدل دقیق سیستم همیشه میسر نمی‌باشد. برای غلبه بر این مشکلات، اخیراً مطالعات بسیاری در زمینه استفاده از روشهای هوشمند در کنترل سیستم تهویه مطبوع انجام پذیرفته است. در این میان نقش کنترل فازی در غلبه بر عدم قطعیت‌های موجود در سیستم تهویه مطبوع بسیار چشمگیر است [۸]. طراحی کنترل فازی مبتنی بر معادلات دینامیکی سیستم تهویه مطبوع نیست، در حالیکه برای طراحی کنترل کننده‌هایی نظیر خطی سازی فیدبکی و کنترل پسگام^۱ دسترسی به مدل نسبتاً دقیقی از این سیستم الزامی است [۹].

در بعضی از روشهای پیشنهادی برای کنترل سیستم تهویه مطبوع، مستقیماً از کنترل فازی استفاده شده است

[۱۰ و ۱۱]. در مواردی نیز ترکیب کنترل فازی، کنترل PID و شبکه عصبی ارائه گردیده است [۱۲-۱۵]. نتایج شبیه-سازیه‌ها عملکرد مطلوب روشهای پیشنهادی را نمایش می‌دهند. اما این عملکرد مطلوب به دلیل افزایش تعداد قواعد موجود در پایگاه قواعد موتور استنتاج این کنترل کننده‌ها ایجاد گردیده است. بنابراین در پیاده‌سازی عملی این کنترل-کننده‌ها باید از پردازشگرهای سرعت بالا استفاده شود و در صورت بروز تاخیر در محاسبات ورودی کنترل، پایداری سیستم حلقه بسته امکانپذیر نخواهد بود.

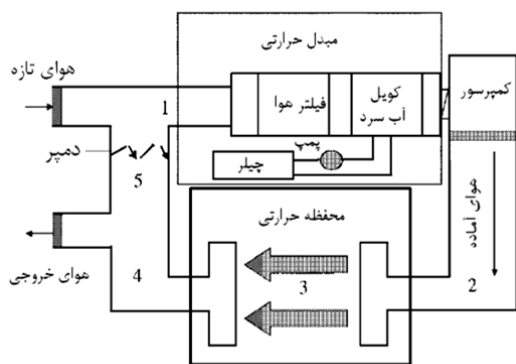
برای برطرف نمودن مشکل فوق، محققین از ترکیب کنترل کننده PID، منطق فازی و الگوریتم PSO استفاده نموده‌اند [۱۶]. در کنترل پیشنهادی به دلیل استفاده از سیستم TSK فازی، تعداد قواعد موجود در پایگاه قواعد موتور استنتاج فازی کاهش چشمگیری داشته است. بنابراین کنترل پیشنهادی از حجم محاسبات پایینی برخوردار است. نتایج شبیه‌سازیه‌ها نشان می‌دهد که کنترل کننده پیشنهادی در مقایسه با کنترل کننده PID، دارای عملکرد مطلوبتری است. از آنجا که طراحی روش پیشنهادی بر اساس مدل خطی سیستم تهویه مطبوع انجام شده است، بنابراین عملکرد مطلوب کنترل پیشنهادی تنها در ناحیه محدودی حول نقطه کار سیستم تضمین می‌گردد.

امروزه برای افزایش کارایی کنترل فازی در کنترل سیستمهای دارای عدم قطعیت، از الگوریتم‌های شهودی نظیر الگوریتم ژنتیک استفاده شده است [۱۷]. اما این الگوریتم با مشکلاتی نظیر حجم محاسبات بالا و گرفتاری در نقاط کمینه محلی روبرو است. در ادامه محققین برای غلبه بر این مشکلات، در کنترل فازی سیستمهای دارای عدم قطعیت، از الگوریتم PSO استفاده نمودند. اما این الگوریتم تنها مشکل حجم محاسبات را برطرف نمود [۱۸ و ۱۹].

اخیراً برای کنترل سیستمهای دارای عدم قطعیت، از ترکیب کنترل فازی TSK و الگوریتم دارلا استفاده شده است [۲۰ و ۲۱]. در کنترل پیشنهادی، کنترل فازی TSK تعداد قواعد پایگاه قواعد را کاهش داده است و الگوریتم دارلا نیز به سرعت بهره‌های بهینه ورودی و خروجی کنترل فازی را محاسبه می‌نماید. نتایج شبیه‌سازی عملکرد مطلوب روش پیشنهادی را تایید می‌نماید.

^۱ Backstepping Control

- پس از آن، هوای آماده ورود به محفظه حرارتی، از مبدل حرارتی خارج می‌شود (موقعیت ۲). هوای آماده وارد محفظه حرارتی می‌شود تا گرمای محسوس (حرارت واقعی) و نهان (رطوبت) بار گرمایی را با توجه به شرایط سیستم جبران نماید.
- در انتها هوای محفظه حرارتی توسط کمپرسور کشیده می‌شود و ۷۵٪ آن به سیستم برگردانده می‌شود و بقیه از سیستم خارج می‌شود (موقعیت ۴). استفاده از تجهیزات دور متغیر در تأمین آب خنک و هوای مورد نیاز سیستم، منجر به کاهش مصرف انرژی در بلند مدت خواهد شد و از لحاظ اقتصادی بسیار مقرون به صرفه است. سیستم تهویه اغلب در حالت پاره بار - حالتی که نیاز به استفاده از حداکثر توان نمی‌باشد - کار می‌کند. پس هدف در هر نوع بهینه سازی باید کاهش مصرف انرژی به ویژه در حالت های پاره بار باشد. در این سیستم، دبی هوای آماده توسط دور کمپرسور تنظیم می‌شود و با افزایش دور کمپرسور افزایش می‌یابد. همچنین دبی آب سرد نیز توسط یک پمپ دور متغیر تنظیم می‌شود.



شکل ۱- سیستم تهویه مطبوع تک منطقه ای در حالت سرمایه

معادلات دیفرانسیل رفتار دینامیکی سیستم نشان داده شده در شکل ۱ را می‌توان از بسط معادلات انرژی و پایداری جرم بدست آورد. در بیشتر مدل های ارائه شده جهت تقریب سیستم از بعضی فرض های ساده کننده استفاده می‌شود و یا توسط روش های متداول شناسایی، مدل سیستم جهت کنترل آن بدست آمده است.

در این مقاله سعی بر آن است تا با ارائه یک کنترل کننده فازی TSK مرتبه بالا و اعمال آن بر روی مدل غیر خطی سیستم، کنترل سیستم تهویه مطبوع را تبدیل به کنترل فازی تطبیقی نماید، که مشکلات روش های ارائه شده را نداشته باشد. در طراحی کنترل پیشنهادی از سیستم فازی TSK مرتبه بالا استفاده می‌شود تا تعداد قواعد موجود در پایگاه قواعد موتور استنتاج کنترل کننده کاهش یابد. سپس با استفاده از الگوریتم سرعت بالای دارلا، بهره‌های بهینه خروجی کنترل کننده محاسبه می‌گردد. بنابراین به دلیل حجم محاسبات پایین، پیاده‌سازی عملی کنترل پیشنهادی محقق می‌شود.

در این مقاله سعی شده است در ۶ بخش ساختار و عملکرد کنترل کننده به طور کامل تشریح گردد. بر این اساس: در بخش ۱ به توصیف مدل سیستم و اجزای آن و ارائه مدل دینامیکی سیستم پرداخته می‌شود. سپس در بخش ۲ به شرح ساختار کلی کنترل کننده پیشنهادی خواهیم پرداخت. بخش ۳ به بررسی کنترل کننده فازی مرتبه بالا اختصاص دارد. در بخش ۴ روش اتوماتای یادگیری تقویتی گسسته بیان خواهد شد. در بخش ۵ برای بررسی عملکرد روش پیشنهادی شبیه سازی ها ارائه گردیده است، در این شبیه سازی ها عملکرد کنترل کننده از لحاظ تطبیق پذیری و مقاوم بودن مورد ارزیابی قرار گرفته است و در نهایت بخش ۶، به نتیجه گیری از این مقاله اختصاص دارد.

۱-۱- مدل سیستم

سیستم تهویه مطبوع یک منطقه ای که در این مقاله در نظر گرفته شده است، در شکل ۱ نشان داده شده است. فرایند اصلی سیستم در حالت سرمایه‌ی شرح زیر است [۲۲-۲۴]:

- ابتدا در ترکیب کننده جریان، ۲۵٪ از هوای تازه به سیستم وارد شده و با ۷۵٪ هوای برگشتی مخلوط می‌شود. (موقعیت ۵)
- سپس هوای مخلوط، در ترکیب کننده جریان به منظور تهویه و عملیات انتقال حرارت مربوطه وارد مبدل حرارتی می‌شود (موقعیت ۱). در این قسمت هوای مخلوط از صافی عبور کرده و از روی کویل آب سرد حرکت داده می‌شود.

۲-۱- معادلات دینامیکی سیستم

در این مقاله برای بدست آوردن معادلات حالت سیستم، فرضیات زیر لحاظ شده است [۲۲-۲۴]:

- ۲۵٪ هوای تازه با ۷۵٪ هوای برگشتی از محفظه حرارتی مخلوط می شود.
 - تمامی هوای مخلوط از مبدل حرارتی عبور می کند.
 - قسمتی از هوای آماده با عبور از محفظه حرارتی بوسیله کمپرسور وارد چرخه شده و مابقی از آن خارج می شود.
 - گازها ایده آل فرض شده و کاملاً مخلوط می شوند.
 - فشار در طول فرایند ثابت است.
 - از تلفات و ذخیره سازی حرارتی اجزاء صرفنظر شده است.
 - از حالت گذرا جریان در مخلوط کننده و جداکننده صرفنظر می شود.
 - مدل حسگرها و عملگرها در معادلات در نظر گرفته نشده است.
- با توجه به فرضیات فوق، معادلات دینامیکی سیستم تهویه مطبوع تک منطقه ای در حالت سرمایش به صورت زیر است [۲۵]:

با تغییر متغیرهای (۲)، می توان از معادلات دینامیکی (۱) به معادلات حالت سیستم در شکل استاندارد (۳) رسید.

$$\begin{aligned} \dot{T}_3 &= \frac{f_a}{V_s}(T_2 - T_3) - \frac{h_{fg}f_a}{C_{pa}V_s}(w_s - w_3) + \\ &\frac{1}{\rho_a C_{pa}V_s}(Q_0 - h_{fg}M_0) \\ \dot{w}_3 &= \frac{f_a}{V_s}(w_s - w_3) - \frac{M_0}{\rho_a V_s} \\ \dot{T}_2 &= \frac{f_a}{V_{he}}(T_3 - T_2) - \frac{0.25f_a}{V_{he}}(T_0 - T_3) - \\ &\frac{h_w f_a}{C_{pa}V_{he}}((0.25w_0 + 0.75w_3) - w_s) - \\ &\left(\frac{\rho_w C_{pw} \Delta T_{he}}{\rho_a C_{pa} V_{he}}\right) f_w \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} u_1 &= f_a, u_2 = f_w, x_1 = T_3, x_2 = w_3 \\ x_3 &= T_2, y_1 = T_3, y_2 = w_3 \\ \alpha_1 &= \frac{1}{V_s}, \alpha_2 = \frac{h_{fg}}{C_{pa}V_s}, \alpha_3 = \frac{1}{\rho_a C_{pa}V_s}, \alpha_4 = \frac{1}{\rho_a V_s} \\ \beta_1 &= \frac{1}{V_{he}}, \beta_2 = \frac{\rho_w C_{pw} \Delta T_{he}}{\rho_a C_{pa} V_{he}}, \beta_3 = \frac{h_w}{C_{pa}V_{he}} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \alpha_1 u_1 (x_3 - x_1) - \alpha_2 u_1 (w_s - x_2) + \\ &\alpha_3 (Q_0 - h_{fg}M_0) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 &= \alpha_4 u_1 (w_s - x_2) + \alpha_4 M_0 \\ \dot{x}_3 &= \beta_1 u_1 (x_1 - x_3) + 0.25 \beta_1 u_1 (T_0 - x_1) - \\ &\beta_3 u_1 ((0.25w_0 + 0.75x_2) - w_s) - \beta_2 u_2 \end{aligned} \quad (3)$$

در این مقاله به منظور پیاده سازی مدل، از مقادیر عددی پارامترهای مربوط به سیستم هواساز یک منطقه ای ساختمان بانک مرکزی جمهوری اسلامی ایران استفاده شده است [۲۵].

جدول ۱- معرفی ضرایب و مقادیر مربوط به هر کدام

| پارامترهای سیستم | مقادیر عددی پارامترهای سیستم |
|-------------------|------------------------------|
| دمای هوای خارج | T_0 |
| دمای هوای آماده | T_2 |
| دمای محفظه | T_3 |
| بار رطوبتی | M_0 |
| بار گرمایی محسوس | Q_0 |
| چگالی جرمی هوا | ρ_a |
| چگالی جرمی آب | ρ_w |
| تغییرات دمای مبدل | ΔT_{he} |
| انتالپی آب مایع | h_w |
| انتالپی بخار آب | h_{fg} |
| رطوبت هوای خارج | w_0 |
| رطوبت هوای آماده | w_s |
| رطوبت محفظه | w_3 |
| حجم مبدل حرارتی | V_{he} |
| حجم محفظه حرارتی | V_s |
| گرمای ویژه هوا | C_{pa} |
| گرمای ویژه آب | C_{pw} |

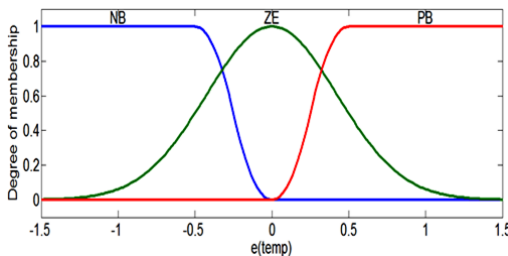
۲- ساختار کلی کنترل کننده پیشنهادی

در این بخش به تشریح ساختار کنترل کننده پیشنهادی جهت کنترل سیستم تهویه مطبوع پرداخته می شود. کنترل کننده های فازی، کنترل کننده هایی غیر خطی با ساختاری خاص می باشند که با بکارگیری نظریه فازی، رفتاری شبیه به انسان خبره در هنگام کنترل سیستم نشان می دهند. ساختار کلی روش پیشنهادی در شکل ۲ آمده است.

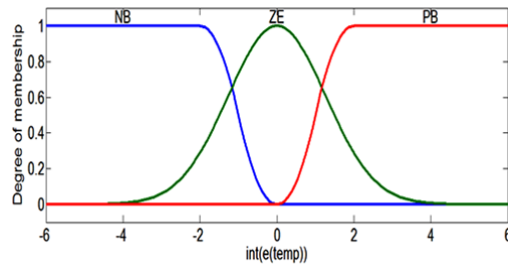
مطابق شکل ۲، کنترل کننده پیشنهادی از ۴ کنترل کننده فازی تشکیل شده است. ورودی های ۱ و ۴ که در سمت چپ شکل مشخص است به ترتیب دما و رطوبت مطلوب مورد نیاز در محفظه حرارتی می باشند. طبق تحقیقات، دمای مطلوب برای بدن انسان ۲۲ (± ۲) درجه

ورودی به محفظه، زمان بیشتری در مجاورت کویل سرمایش قرار گیرد و خنک تر شود.

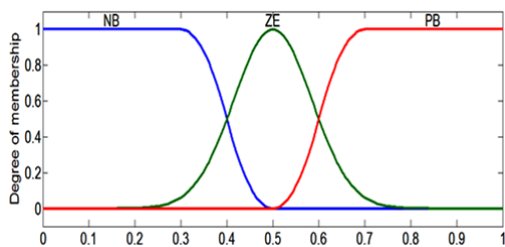
برای طراحی توابع عضویت لازم است دامنه تغییرات مربوط به دو ورودی، یعنی خطای دما و انتگرال آن مشخص شود. بر اساس آزمایش و تجربه دامنه تغییرات خطا $[1/5]$ و دامنه انتگرال خطا $[6]$ و $[-6]$ تعیین گردید. توابع عضویت خطای دما، انتگرال خطای دما و خروجی کنترل کننده ۱ در شکل های ۳، ۴ و ۵ آمده است. در این اشکال، از متغیرهای زبانی ZE، PB و NB استفاده شده است که به ترتیب نشان دهنده مثبت بزرگ، صفر و منفی بزرگ است.



شکل ۳- توابع عضویت خطای دما



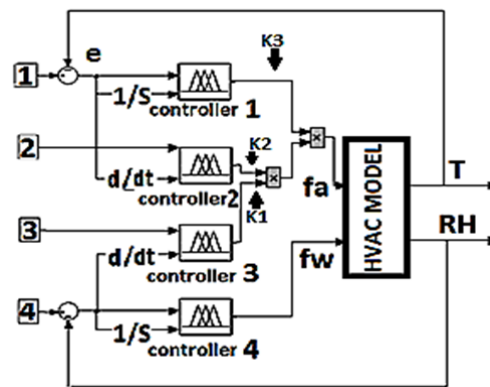
شکل ۴- توابع عضویت انتگرال خطای دما



شکل ۵- توابع عضویت خروجی کنترل کننده ۱

پایگاه قواعد این کنترل کننده بر اساس آزمایش و تجربیات اشخاص خبره تنظیم گردید. پایگاه قواعد کنترل کننده ۱ و

سانتیگراد و رطوبت نسبی هوا $(\pm 0.15) / 45\%$ در نظر گرفته شده است. در این مقاله با توجه به نیاز مسئله، دمای مطلوب ۲۴ درجه سانتیگراد و رطوبت نسبی مطلوب 45% در نظر گرفته شده است [۲۶ و ۲۷].

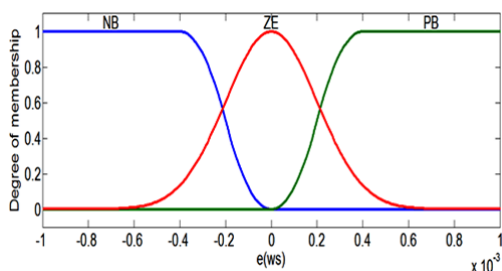


شکل ۲- شمای کلی کنترل کننده سیستم تهویه مطبوع

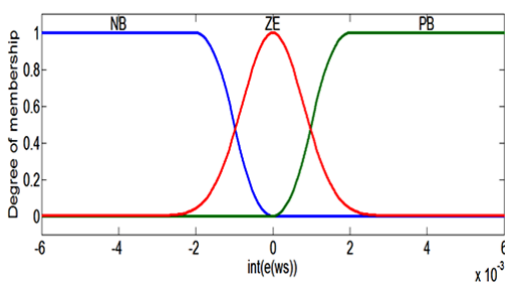
ورودی های ۲ و ۳، مقادیر اولیه دما و رطوبت نسبی قبل از اعمال اثر کنترل کننده در محفظه حرارتی هستند. دامنه تغییرات دمای اولیه محفظه $[16 - 34]$ (درجه سانتیگراد) و همچنین دامنه تغییرات رطوبت اولیه محفظه $[0.006 - 0.009]$ (kg H₂O/kg dry air) فرض شده است. خروجی کنترل کننده های ۱ و ۴ معرف نرخ جریان هوا (f_a) و آب سرد (f_w) می باشد، که به ترتیب توسط پمپ و کمپرسور دور متغیر تأمین می شوند. کنترل کننده های ۲ و ۳ برای تنظیم بهره سیستم و کاهش خطا در خروجی در نظر گرفته شده اند که در بخش ۳ به آن اشاره خواهد شد.

در ابتدا، توابع عضویت کنترل کننده مربوط به تنظیم آهنگ جریان حجمی هوا (کنترل کننده ۱) مورد بررسی قرار می گیرد و دامنه تغییرات مربوط به دو ورودی آن، یعنی خطای دما و انتگرال آن با رسم شکل بیان می شود. راهبرد کنترل بر اساس دمای اولیه محفظه است. در صورتی که دمای محفظه از دمای مطلوب پایین تر باشد، فن اصلی باید با بیشترین توان کار کند و هوای خارج از محفظه بیشتری را به محفظه وارد نماید تا دما به حد مطلوب برسد. در صورتی که دمای محفظه از حد مطلوب بیشتر باشد بر اساس اختلاف دما، فن در اوایل کار با سرعت کم کار می کند تا هوای

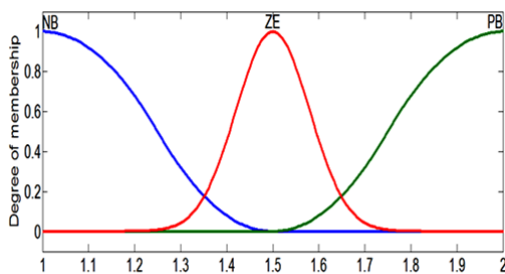
در تجهیزات مربوط به مایعات وجود دارد، باید از اعمال تغییرات ناگهانی توان در پمپ آب پرهیز نمود. در شکل های ۷ و ۸، توابع عضویت مربوط به ورودی های کنترل کننده ۴ نشان داده شده است. حدود تغییرات این ورودی ها با توجه به پاسخ حلقه باز سیستم تنظیم گردیده است. مطابق شکل ۹ با توجه به محدودیت های موجود در پمپ آب، محدوده تغییرات دبی آب [۱-۲] (lit/s) در نظر گرفته شده است.



شکل ۷- توابع عضویت خطای رطوبت محفظه حرارتی



شکل ۸- توابع عضویت انتگرال خطای رطوبت محفظه حرارتی



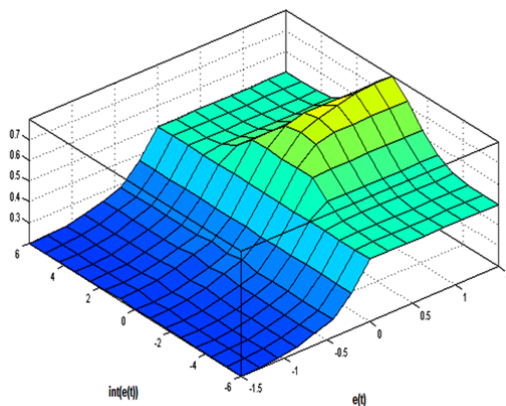
شکل ۹- توابع عضویت خروجی کنترل کننده ۴

از آنجا که متغیرهای زبانی پایگاه قواعد کنترل کننده ۴ مانند کنترل کننده ۱ است، بنابراین پایگاه قواعد کنترل

۴ در جدول ۲ آمده است. در طراحی کنترل کننده فازی از موتور استنتاج ضرب ممدانی، فازی ساز منفرد و غیر فازی ساز میانگین مراکز استفاده شده است. خروجی کنترل کننده ۱ جریان هوا (f_a) است، که در شکل ۶ نشان داده شده است.

جدول ۲- پایگاه قواعد کنترل کننده ۱ و ۴

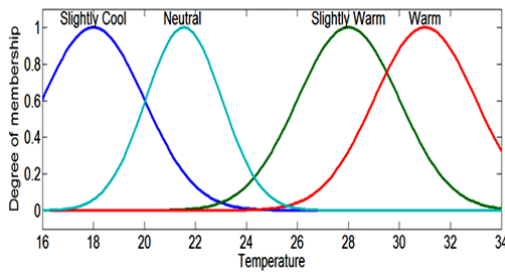
| error | | error | | |
|---------|----|-------|----|----|
| | | NB | ZE | PB |
| f error | NB | NB | ZE | ZE |
| | ZE | NB | ZE | PB |
| | PB | NB | ZE | ZE |



شکل ۶- نمودار سه بعدی خروجی کنترل کننده ۱

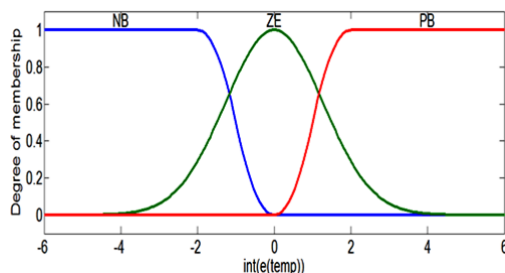
پس از طراحی کنترل کننده ۱، برای طراحی کنترل آهنگ جریان آب خنک (f_w) به گونه دیگری عمل می نمایم.

راهبرد کنترل در این قسمت بر اساس رطوبت و دمای اولیه محفظه می باشد. در صورتی که رطوبت و دمای اولیه محفظه از رطوبت و دمای مطلوب پایین تر باشد، پمپ آب خنک با حداکثر توان کار می کند تا هم بتواند رطوبت هوای مخلوط ورودی به محفظه که به نسبت بالاست را کاهش دهد و هم از دمای هوای ورودی به محفظه بکاهد. در صورتی که دمای اولیه محفظه از دمای مطلوب بالاتر باشد پمپ آب خنک با توجه به کم بودن سرعت فن، در اوایل کار با توان کمتری کار می کند تا رطوبت هوای ورودی به محفظه بیش از حد کاهش نیابد و پس از مدت کوتاهی در حالت پایدار کار می نماید. لازم بذکر است که با توجه به محدودیت هایی که



شکل ۱۱- توابع عضویت مربوط به دمای اولیه محفظه حرارتی

در ادامه، مشتق خطای دما به سه مجموعه فازی NB، ZE و PB مطابق شکل ۱۲ تقسیم گردید.



شکل ۱۲- توابع عضویت مشتق خطای دما

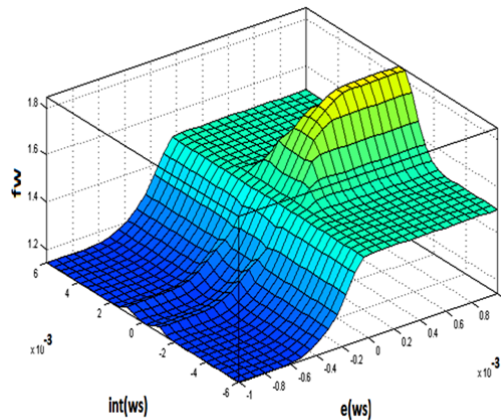
پایگاه قواعد کنترل کننده‌ی سوگینو با آزمایشهای مکرر و بر حسب نیاز مسئله و عملکرد سیستم حلقه باز طراحی گردید. پایگاه قواعد این کنترل کننده در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳- پایگاه قواعد مربوط به کنترل کننده ۲

| Temperature d/dt(e(t)) | Slightly Cool | Neutral | Slightly Warm | Warm |
|---------------------------|---------------|---------|---------------|-------|
| | NB | u_1 | u_4 | u_7 |
| ZE | u_2 | u_5 | u_7 | u_7 |
| PB | u_3 | u_6 | u_8 | u_8 |

ضرایب مربوط به خروجی هر قاعده به شرح زیر می‌باشد:
 $u_1=[1.9 \ 2 \ -1]$, $u_2=[1.9 \ 2 \ -3]$, $u_3=[1.9 \ 2 \ -3.2]$,
 $u_4=[1.3 \ 1 \ 0]$, $u_5=[1.1 \ 1 \ 2]$, $u_6=[1.5 \ 1 \ 3]$,
 $u_7=[1.1 \ 1 \ 2]$, $u_8=[1.1 \ 1 \ 3]$
 در طراحی کنترل کننده‌ی ۳، دامنه تغییرات رطوبت اولیه محفظه [۰/۰۰۹ و ۰/۰۰۶] و دامنه مشتق خطای رطوبت [۰/۰۰۶ و -۰/۰۰۶] در نظر گرفته شد. رطوبت اولیه محفظه حرارتی به سه مجموعه فازی Low و Medium و High

کننده ۱ را نیز می‌توان برای کنترل کننده ۴ استفاده نمود. موتور استنتاج این کنترل کننده ضرب ممدانی و غیر فازی ساز آن میانگین مراکز تعیین گردید. خروجی کنترل کننده ۴ جریان آب (f_w) است، که در شکل ۱۰ نمایش داده شده است.



شکل ۱۰- نمودار سه بعدی خروجی کنترل کننده ۴ (f_w)

در ادامه به بررسی کنترل کننده‌های مربوط به تنظیم بهره آهنگ جریان حجمی هوا پرداخته می‌شود و دامنه تغییرات مربوط به ورودیها و خروجیهای آنها را بیان خواهیم نمود. از شکل ۲ مشاهده می‌شود که بلوکهای ۲ و ۳ برای این مهم در نظر گرفته شده‌اند. ورودی های مربوط به کنترل کننده ۲، دمای اولیه محفظه حرارتی قبل از اعمال اثر سیستم تهویه مطبوع و مشتق خطای دما می باشد، همچنین ورودی های مربوط به کنترل کننده ۳، رطوبت اولیه محفظه حرارتی قبل از اعمال اثر سیستم تهویه مطبوع و مشتق خطای رطوبت است. بر مبنای نیاز های مسئله، دامنه تغییرات دمای اولیه محفظه [۱۶ - ۳۴] و دامنه مشتق خطای دما [۶ - -۶] در نظر گرفته شده است. در طراحی کنترل کننده، دمای اولیه محفظه به چهار مجموعه فازی Slightly Warm، Neutral، Slightly Cool و Warm تقسیم گردید. تابع عضویت Slightly Cool از نوع گوسین با میانگین ۱۸ و واریانس ۲، تابع عضویت Neutral از نوع گوسین با میانگین ۲۱/۵ و واریانس ۱/۵، تابع عضویت Slightly Warm از نوع گوسین با میانگین ۲۸ و واریانس ۲ و تابع عضویت Warm از نوع گوسین با میانگین ۳۱ و واریانس ۲ می باشند. این توابع عضویت در شکل ۱۱ نشان داده شده‌اند.

ضرایب مربوط به خروجی هر قاعده به شرح زیر است :
 $w_1=[10 \ 10 \ 0.8]$, $w_2=[10 \ 10 \ 0.85]$,
 $w_3=[10 \ 10 \ 0.9]$

۳- کنترل کننده فازی مرتبه بالا

کنترل کننده فازی مرتبه بالا، کنترل کننده‌ای است با ساختاری ساده که جواب نهایی آن از ضرب خروجی چند کنترل کننده سوگینو به دست می‌آید. در ابتدا توضیح مختصری از روش سوگینو ارائه می‌گردد. پایگاه قواعد کنترل کننده سوگینو به صورت زیر است [۲۸]:

اگر x_0, x_1, \dots, x_n باشد و A_n^1, \dots, A_1^1 باشد، آنگاه $u^1 = c_0^1 + c_1^1 x_1 + \dots + c_n^1 x_n$ که A_i^1 مجموعه‌های فازی، c_i^1 ضرایب ثابت و $l = 1, 2, \dots, M$ تعداد قواعد می‌باشد. بنابراین نتیجه می‌شود که قسمت اگر قواعد کنترل سوگینو مانند قسمت اگر سیستم فازی ممدانی است. اما قسمت آنگاه آن ترکیب خطی از متغیرهای ورودی است. به ازای ورودی $x = (x_1, \dots, x_n)^T \in \mathbb{R}^n$ ، خروجی $f(x) \in V \subset \mathbb{R}$ سیستم فازی سوگینو به صورت متوسط وزن دار شده به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$f(x) = \frac{\sum_{l=1}^M u^l w^l}{\sum_{l=1}^M w^l} \quad (4)$$

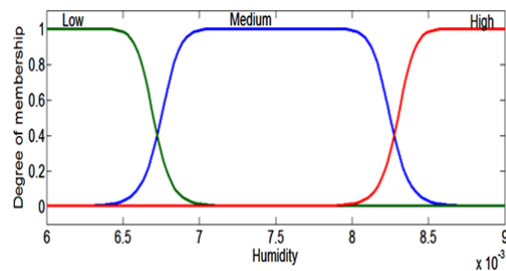
که وزن های w^l از رابطه زیر محاسبه می‌شوند:

$$w^l = \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^1}(x_i) \quad (5)$$

معنی فیزیکی رابطه‌ی (۴) و (۵) این است که وقتی X به محدوده فازی که به وسیله بخش اگر قاعده توصیف می‌شود مقید گردد، آنگاه خروجی یک تابع خطی از متغیرهای ورودی می‌شود. بنابراین سیستم فازی می‌تواند تا اندازه‌ای همانند یک تابع قطعه قطعه فازی تصور گردد، که تغییرات آن از یک قطعه به قطعه دیگر ملایم می‌شود.

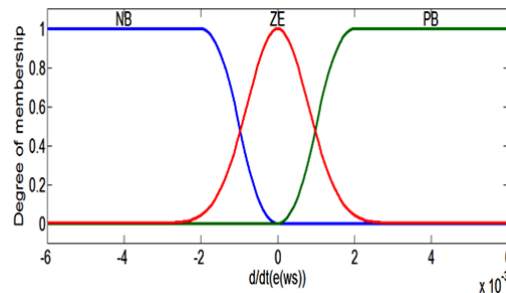
از آنجا که در روش سوگینو هر قاعده دارای خروجی قطعی است و خروجی نهایی با محاسبه میانگین وزن دار شده، محاسبه می‌شود، بنابراین این روش فاقد فرایند زمان بر غیر فازی سازی است. پس از بیان ساختار کنترل کننده فازی، در ادامه کنترل فازی مرتبه بالا شرح داده می‌شود. در حات کلی، روش کنترل فازی مرتبه بالا به صورت زیر است [۲۸]:

تقسیم گردید. این مجموعه‌های فازی از نوع ناقوسی و به ترتیب با مشخصات $[0.007 \ 6 \ 0.006]$ ، $[0.007 \ 6 \ 0.0075]$ و $[0.007 \ 6 \ 0.009]$ در شکل ۱۳ آمده است.



شکل ۱۳ - توابع عضویت رطوبت اولیه هوا در محفظه حرارتی

ورودی مشتق خطای رطوبت به سه مجموعه فازی NB و ZE و PB مطابق شکل ۱۴ تقسیم گردید.



شکل ۱۴ - توابع عضویت مربوط به مشتق خطای رطوبت

پایگاه قواعد این کنترل کننده نیز مانند کنترل کننده‌ی ۲ تنظیم گردید. پایگاه قواعد این کنترل کننده در جدول ۴ ارائه گردیده است.

جدول ۴- پایگاه قواعد مربوط به کنترل کننده ۳

| | | Temperature | | |
|------------|----|-------------|--------|-------|
| | | Low | Medium | High |
| d/dt(e(t)) | NB | w_1 | w_2 | w_3 |
| | ZE | w_1 | w_2 | w_3 |
| | PB | w_1 | w_2 | w_3 |

- رطوبت اولیه محفظه حرارتی، بسیار مهم می باشد و قابلیت تنظیم آن را در این بازه نسبتاً بزرگ، آسانتر می نماید.
۳. از مزایای دیگر این کنترل کننده می توان به مقاوم بودن آن در برابر تغییرات محیطی نظیر تغییرات در بار گرمایی و در بار رطوبتی اشاره نمود.
۴. تطبیق پذیری بسیار مناسب نیز از دیگر مزایای بسیار مهم این روش کنترلی است.
۵. برای طراحی کنترل کننده TSK فازی، باید اطلاعات سیستم تحت کنترل در دسترس باشد. در اینصورت تعداد قواعد موجود در پایگاه قواعد این کنترل کننده کاهش می یابد.

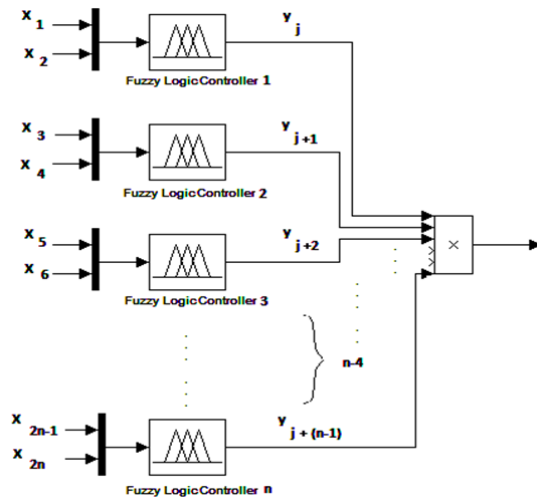
۴- روش اتوماتای یادگیری

با توجه به اینکه در این مقاله هدف اصلی دسترسی به دما و رطوبت مطلوب با کمترین خطا و در کمترین زمان ممکن است، برای به حداقل رساندن خطا از روش اتوماتای یادگیری برای تنظیم نهایی بهره های K_1 ، K_2 و K_3 که در شکل ۲ آمده است، استفاده نموده ایم.

ایده اصلی یادگیری غریزی در موجودات زنده بر اساس اندرکنش با محیط پیرامون می باشد. در این نوع یادگیری موجود زنده بدون نیاز به آموزش دهنده به تقابل با محیط می پردازد و با استفاده از قوای حسی خود می تواند نتیجه بگیرد که با چه محیطی روبرو است. این رابطه علت و معلولی با محیط برای موجود الگوی رفتاری محیط را مشخص می نماید. هر چند که اعمال موجود برای شناختن محیط در ابتدا سیر تصادفی دارد، اما با افزایش تعداد اعمال موجود از روی نتایج گذشته تصمیمات معقولانه تری را اتخاذ می نماید.

این منطق یادگیری در بسیاری از وجوهات زندگی انسانها نظیر رانندگی اتومبیل، صحبت کردن، راه رفتن و غیره دیده می شود. بنابراین عامل یادگیری همواره به دنبال آن است که کاری را انجام دهد که بر طبق رفتارهای گذشته، انتظار عکس العمل مطلوبتر از محیط را دارد. در یادگیری تقویتی، این الگوی رفتاری به صورت محاسباتی فرموله شده، برای کنترل فرایندها و سیستمها به کار برده می شود.

در این روش، هدف حداکثر نمودن درجه رضایتمندی از محیط است و درجه رضایتمندی از محیط، می تواند به



شکل ۱۵- ساختار کلی روش کنترل فازی مرتبه بالا

از شکل ۱۵ نتیجه می شود که کنترل فازی مرتبه بالا از ضرب خروجی های n کنترل کننده فازی سوگینو به دست می آید. رابطه ی کنترل کننده فازی مرتبه بالا به صورت زیر است [۲۸]:

$$\prod_{i=1}^n \left(\sum_{l_i} \frac{u^{l_i} w^{l_i}}{w^{l_i}} \right) \quad (6)$$

که i تعداد خروجی کنترل کننده های سوگینو و M_i تعداد قواعد مربوط به هر کنترل کننده است.

پس از بیان ساختار کلی کنترل کننده فازی مرتبه بالا، در ادامه به بررسی مزایا، ویژگی ها و مشخصات این کنترل کننده پرداخته می شود:

۱. سیستم تهویه مطبوع، سیستمی از نوع چند ورودی و چند خروجی است. به گونه ای که تغییر در هر ورودی بر تک تک خروجی های این سیستم تأثیر گذار است. با به کارگیری این روش کنترلی سعی بر آن است که از تأثیر متقابل هر یک از متغیرهای ورودی نهایت استفاده را نموده و بیشترین تأثیر را بر خروجی های سیستم ایجاد نماییم.
۲. با این روش می توان با توجه به اولویت بندی در تصمیم ها، از بهره ی خروجی هر کنترل کننده اهمیت آن را کم یا زیاد نمود. شایان ذکر است که این اولویت بندی با توجه به بازه کنترلی دما و

با توجه به شکل ۱۶، اولین مرحله انتخاب بازه‌ها تصادفی است که باید به عنوان ورودی به سیستم اعمال شود. چنانچه سیستم تحت کنترل دارای n متغیر تصمیم باشد، n تابع چگالی احتمال گسسته نیز خواهیم داشت. این توابع در ابتدا به صورت یکنواخت و طبق رابطه (۷) تعریف می‌شوند. در این مسئله تعداد متغیرهای تصمیم با توجه به بهره‌های $K_1, K_2, K_3, \dots, K_n$ می‌باشد.

$$f_i^{(0)}(d) = \begin{cases} \frac{1}{N_i}, & d = 1, 2, \dots, N_i \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (7)$$

$i = 1, 2, \dots, n$

که N_i تعداد بازه‌های متغیر تصمیم i ام و d اندیس بازه است. بنابراین در ابتدای روش، احتمال انتخاب هر یک از بازه‌های متغیرهای تصمیم یکسان است. هرچه N_i مقدار عددی بیشتری داشته باشد، دقت بیشتر می‌شود.

پس از انتخاب بازه‌های تصمیم، باید این مجموعه بازه‌ها به سیستم تحت کنترل اعمال شود. اما برای محاسبه تابع هزینه نمی‌توان یک بازه که شامل بینهایت نقطه است را به سیستم تحت کنترل اعمال نمود. به این منظور در هر بازه P نقطه با فاصله یکسان از یکدیگر در نظر گرفته می‌شود و هزینه منتسب به این مجموعه، می‌نیمم هزینه متناظر با اعضای مجموعه است و تابع هزینه از نوع اسکالر می‌باشد.

پس از محاسبه تابع هزینه، این هزینه با هزینه‌های تکرارهای قبلی مقایسه شده و سیگنال تقویت محاسبه می‌شود. سیگنال تقویت معیاری از عملکرد مناسب مجموعه بازه‌های انتخاب شده است. یعنی هر چه مجموعه انتخاب شده مناسب‌تر باشد، مقدار این سیگنال بیشتر است. تابعی که برای محاسبه سیگنال تقویت از روی تابع هزینه استفاده می‌شود در زیر آمده است.

$$\beta(J) = \min \left\{ 1, \max \left\{ 0, \frac{J_{mean} - J}{J_{mean} - J_{min}} \right\} \right\} \quad (8)$$

که J_{mean} و J_{min} به ترتیب میانگین و حداقل هزینه‌های قبلی است.

مطابق رابطه (۸)، محدوده تغییرات β بین صفر و یک است و هزینه‌هایی که بالاتر از میانگین هزینه‌های قبلی باشد، منجر به تقویت صفر و هزینه‌هایی که کمتر از حداقل هزینه‌های قبلی باشد، تقویت یک را در بر خواهد داشت. خاصیت مهم رابطه (۸) این است که با افزایش تکرارها،

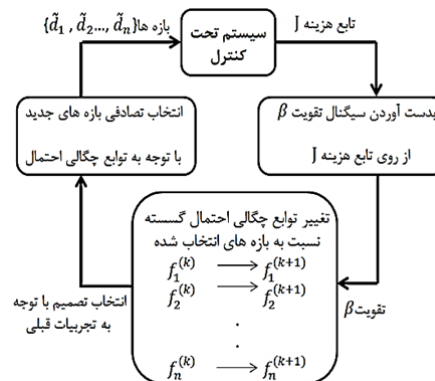
صورت تابعی از وضعیتی که محیط در آن قرار دارد تعریف شود. لازم به ذکر است که در یادگیری تقویتی حداکثر نمودن درجه رضایتمندی و کمینه کردن تابع هزینه در طولانی مدت مدنظر است.

یکی از نقاط قوت روش یادگیری تقویتی، توانایی کنترل فرایندهای دارای نامعینی در سیستم تحت کنترل است. این نامعینی می‌تواند ناشی از دینامیکهای مدل نشده یا پارامترهای متغیر در ساختار سیستم باشد. این توانایی روش یادگیری تقویتی از آنجا نشأت می‌گیرد که در طی فرایند یادگیری به دینامیکهای سیستم تحت کنترل اتکایی نشده است [۲۰ و ۲۱].

بنابراین یادگیری تقویتی در مسائلی که مدل‌سازی آنها پیچیده است و نیز مسائلی که مدل ساده شده آنها برای کنترل فرایند کفایت نمی‌کند، می‌تواند بسیار سودمند باشد.

۴-۱- اتوماتای یادگیری تقویتی گسسته

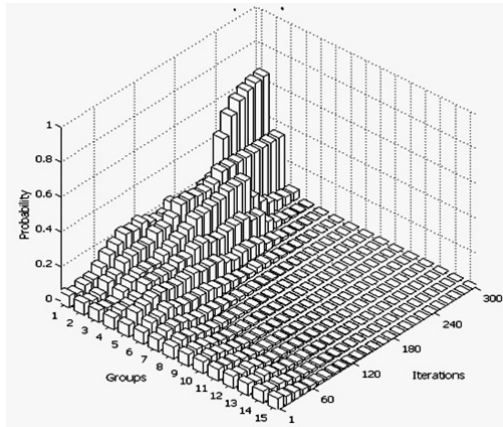
در این روش، ابتدا مقادیر هر یک از متغیرهای تصمیم به بازه‌هایی با طول مساوی تقسیم می‌شود [۲۰ و ۲۱]. نکته‌ای که در انتخاب بازه‌های متغیرهای تصمیم باید مد نظر قرار گیرد آن است که اگر تعداد بازه‌ها زیاد و طول آنها کوچک انتخاب شود، زمان همگرایی روش دارلا^۱ افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که عکس این قضیه نیز صادق است. شمای کلی روش دارلا در شکل ۱۶ آمده است.



شکل ۱۶- شمای کلی روش دارلا

¹ DARLA

تعریف نمود. این ضابطه می‌تواند تغییر نکردن میانگین هزینه‌ها به تعداد مشخص، تعداد تکرارهای مشخص و یا کمتر شدن هزینه از یک آستانه مشخص باشد.



شکل ۱۷- رویه همگرایی روش دارلا

در این مقاله حدود تغییرات هر یک از بهره‌ها بین صفر تا ۱/۲ و تعداد بازه‌ها برای دقت بیشتر ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده است. تابع هزینه‌ای که در این مقاله انتخاب شد، در زیر آمده است.

$$J = G_e \int_0^T t e^2(t) dt \quad (12)$$

که T زمان کل شبیه‌سازی، $e(t)$ خطای ردیابی که در شکل ۲ با e نشان داده شده است و ضرایب G_e وزن‌های المانهای هزینه می‌باشند. تعداد تکرار روش دارلا ۱۲۰ تکرار و T برابر ۱۰۰۰ ثانیه فرض شده است.

با توجه به بازه گسترده‌ای از دما و رطوبت که به عنوان ورودی برای این سیستم در نظر گرفته شده است. در هر مرحله با توجه به میزان دما و رطوبت مربوط به آن، با پیاده‌سازی روش اتوماتای یادگیری، بهره‌های سیستم محاسبه می‌گردد.

لازم به ذکر است که بحث کنترل متغیرهای محفظه حرارتی، به دلیل بعضی شرایط و محدودیت‌های دینامیکی، متغیرهای کنترلی باید در محدوده مشخصی قرار داشته باشند. جریان آب سرد و جریان هوای کمپرسور باید دارای حداکثر مقادیری باشند که بر اساس محدودیت‌های مکانیکی عملگرها بدست می‌آیند. به عنوان مثال با افزایش بیش از

همواره میانگین هزینه‌ها روندی نزولی دارد و با توجه به محدود و خطی بودن رابطه تقویت و هزینه، همگرایی این روش تضمین می‌شود.

پس از محاسبه سیگنال تقویت، توابع چگالی احتمال گسسته متناسب با آن و با مرکزیت بازه انتخاب شده، تغییر می‌یابد. اما این تغییر نباید به صورت منفرد اعمال شود. زیرا اگر بازه تصمیم \vec{d}_i عملکرد خوبی داشته باشد، بازه‌های نزدیک به آن هم عملکرد نسبتاً خوبی دارند. یکی از روشهای تغییر در چگالی احتمال گسسته استفاده از تابع نمایی معکوس Q است که طبق رابطه (۹) تعریف می‌شود.

$$Q(d, r) = \lambda 2^{-(d-r)^2} \quad (9)$$

در هر مرحله مجموعه جدیدی از بازه‌ها با توجه به توابع چگالی احتمال انتخاب می‌شود. این انتخاب توسط عدد تصادفی r ، که $r \in (0, 1]$ و با استفاده از احتمال تجمعی هر یک از بازه‌های تصمیم، انجام می‌شود. پارامتر λ یک عدد کاملاً مثبت است که در سرعت و دقت همگرایی روش موثر است. بروزسانی توابع چگالی احتمال نیز مطابق رابطه (۱۰) انجام می‌شود.

$$f_i^{(k+1)}(d) = \alpha_i^{(k)}(f_i^{(k)} + \beta(k)Q(d, \vec{d}_i)) \quad (10)$$

$$d = 1, 2, \dots, N_i$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

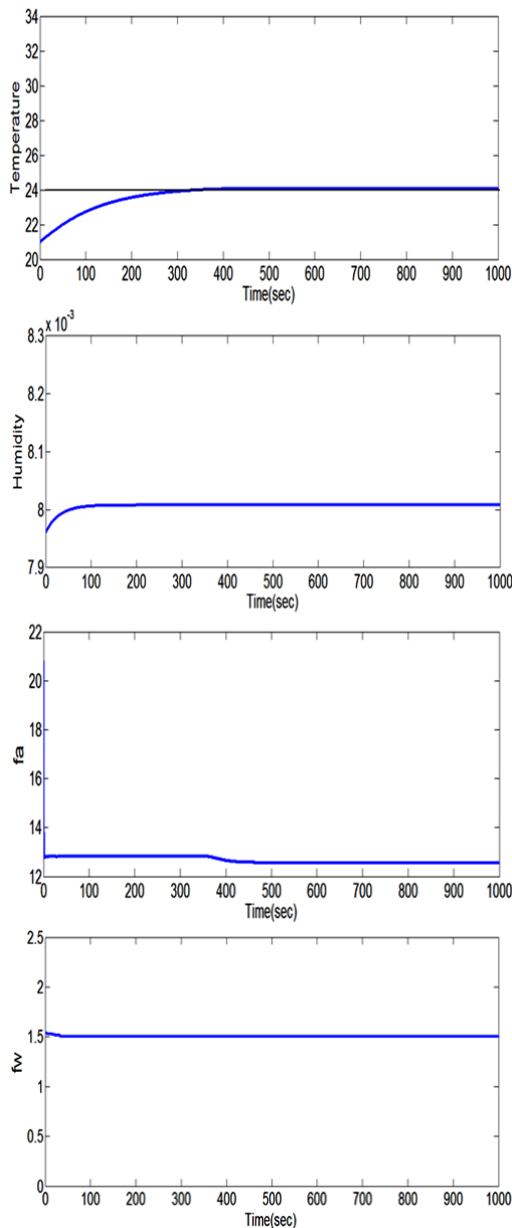
که α برای نرمالیزه کردن تابع چگالی احتمال بوده و از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$\alpha_i^{(k)}(d) = \frac{1}{\sum_{q=1}^{N_i} f_i^{(k)} + \beta(k)Q(d, \vec{d}_i)} \quad (12)$$

پس از تغییر توابع چگالی احتمال گسسته، فرایندهای گذشته

دوباره تکرار می‌شود. با تکرار این حلقه به تعداد کافی، توابع چگالی احتمال در نقاط بهینه حداکثر می‌شوند. بنابراین در تکرار انتهایی، در جایی که این توابع بیشترین مقدار خود را دارند، آن نقاط همان نقاط بهینه می‌باشند. با کنار هم قرار دادن توابع چگالی احتمال، رویه سه بعدی بدست می‌آید که آن را رویه همگرایی می‌نامند و از روی آن روند تغییرات توابع چگالی احتمال براحتی قابل درک می‌باشد. در شکل ۱۷ نمونه‌ای از رویه همگرایی روش دارلا نشان داده شده است [۲۰ و ۲۱].

با توجه به اینکه ساختار روش دارلا متکی به یک ساختار تکرار است، بنابراین برای خاتمه عملیات باید ضابطه‌ای را



شکل ۱۸ - نرخ جریان هوا و آب سرد و پاسخ نهایی سیستم (دمای ۲۱ درجه سانتیگراد و رطوبت ۰/۰۰۷۹۶۰)

برای بررسی نتایج شبیه‌سازی در هر قسمت، از ۴ نمودار استفاده شده است. نمودار اول به بررسی شرایط دمایی در محفظه حرارتی اختصاص دارد. به عنوان مثال، شکل ۱۸ نشان می‌دهد که دمای اولیه محفظه قبل از اثر سیستم تهویه، ۲۱

اندازه بار سرمایشی و با در نظر گرفتن محدودیت جریان در کویل آب سرد، ممکن است جهت تأمین بار برودتی مورد نیاز، دمای آب سرد به زیر صفر برسد که این حالت امکان پذیر نمی‌باشد.

در مورد مقادیر آهنگ جریان هوا و آب خنک، باید به حجم محفظه حرارتی و بار گرمایی و رطوبتی و درصد مخلوط شدن هوای تازه با هوای برگشتی از محفظه توجه گردد و بر اساس آن تنظیمات صورت گیرد. بنابراین هر گونه تغییر اساسی در این موارد، تغییر در راهبرد کنترل را با خود به همراه خواهد داشت.

۵ - بررسی نتایج شبیه سازی

این بخش به بررسی پاسخ سیستم با کنترل پیشنهادی اختصاص دارد. در این بخش تلاش می‌شود تا نقاط قوت و مزایای روش کنترل پیشنهادی بیان گردد.

یکی از مزایای کنترل کننده ارائه شده در این است که این کنترل کننده قادر است علاوه بر تنظیم دماهای بالاتر از حد مطلوب، تنظیم دماهای پایین تر از حد مطلوب در محفظه حرارتی را نیز انجام دهد. با توجه به اینکه هوای آماده ترکیبی از هوای برگشتی و هوای خارج است، سیستم تهویه قادر است در صورتی که دمای محفظه حرارتی کمی پایین تر از دمای مطلوب باشد، هدف را دنبال کرده و شرایط مطلوب را فراهم نماید.

هوایی که وارد اتاق‌ها می‌گردد، ترکیبی از هوای تازه و هوای برگشتی از اتاق‌ها است و میزان دبی این دو جریان از طریق دریچه‌ها و یا دمپر هایی که بر سر راه آنها وجود دارد، قابل تنظیم است. ترکیب هوای تازه و هوای برگشتی در زیر آمده است:

$$T_o * f_{a(outside)} + T_{return} * f_{a(return)} = T_{mixed} * f_{a(mixed)} \quad (13)$$

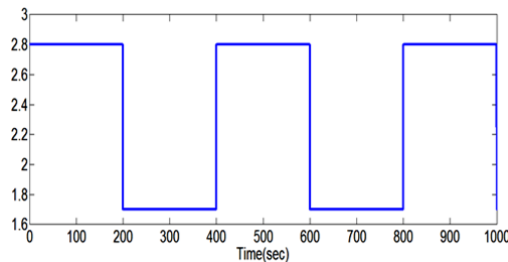
با توجه به اینکه دمای هوای تازه خارج از محفظه، ۳۰ درجه سانتیگراد است، در ابتدا فن اصلی با حداکثر توان کار می‌کند تا بتواند هوای تازه بیشتری را به محفظه بفرستد و دما را تعدیل نماید. پمپ تأمین کننده آب خنک نیز با حداکثر توان شروع به کار می‌کند تا بتواند از رطوبت نسبی هوای ورودی بکاهد.

مقادیر ارائه شده بر حسب (m^3/s) است. سرانجام نمودار چهارم تغییرات نرخ آهنگ جریان آب خنک با گذشت زمان را نشان می‌دهد. مقادیر ارائه شده بر حسب (lit/s) است. جزئیات شکل های ۱۸ و ۱۹ در تک تک بازه های دمایی و رطوبتی در جدول ۵ آمده است.

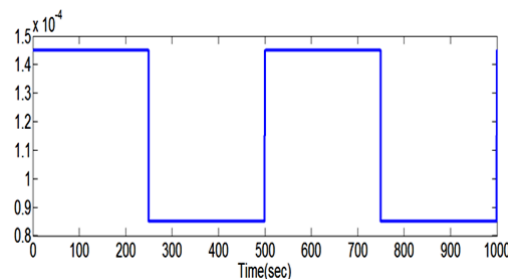
شکل ۱۹، عملکرد کنترل کننده را در حالتی که دمای اولیه محفظه ۲۹ درجه سانتیگراد و رطوبت آن 0.008165 است، نشان می‌دهد. در این بخش برای نمایش عملکرد کنترل پیشنهادی به شکل های ۱۸ و ۱۹ اکتفا نموده، اما نتایج کلی برای تمام بازه های دمایی در جدول ۵ ارائه گردیده است.

۵-۱- بررسی مقاوم بودن کنترل کننده پیشنهادی

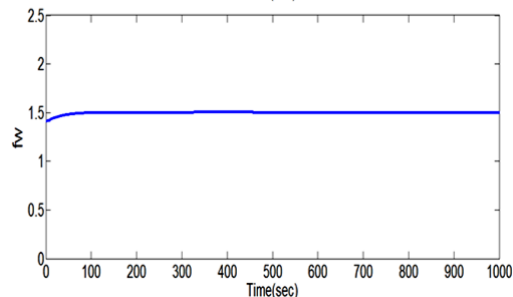
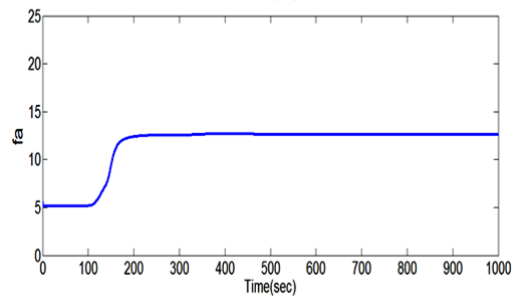
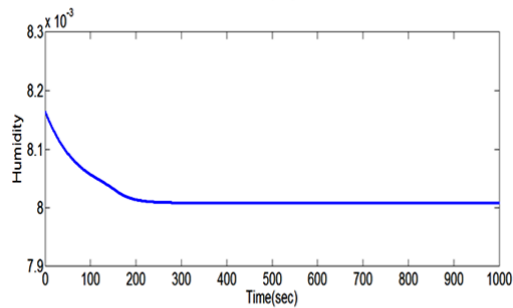
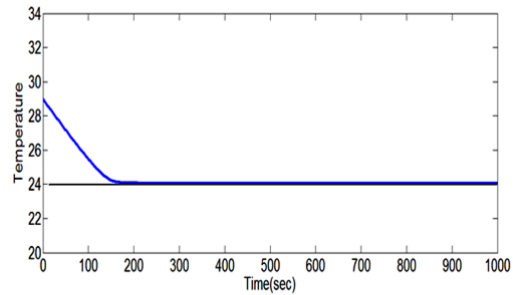
برای تحلیل مقاوم بودن کنترل کننده پیشنهادی، پاسخ سیستم حلقه بسته سیستم در حضور اغتشاشات خارجی بر روی متغیر های محیطی بار رطوبتی و بار گرمایی (M_0 و Q_0) مورد بررسی قرار گرفت. شکل های ۲۰ و ۲۱ اغتشاش بر روی متغیر های بار گرمایی محیطی و بار رطوبتی را نشان می‌دهند. پاسخ سیستم حلقه بسته در حضور این اغتشاشات در شکل ۲۲ آمده است.



شکل ۲۰- اغتشاش بار گرمایی



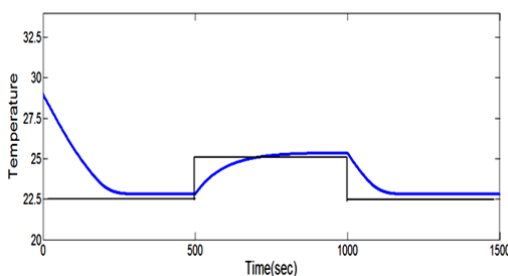
شکل ۲۱- اغتشاش بار رطوبتی



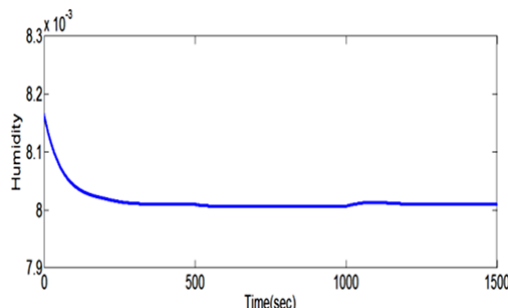
شکل ۱۹- نرخ جریان هوا و آب سرد و پاسخ نهایی سیستم (دمای ۲۹ درجه سانتیگراد و رطوبت 0.008165)

درجه سانتیگراد بوده که بعد از اثر سیستم با گذشت حدود ۳۰۰ ثانیه به مقدار مطلوب رسیده است. نمودار دوم بیانگر رطوبت محفظه است. مطابق این شکل، رطوبت محفظه پس از ۷۰ ثانیه به مقدار 0.0079 رسیده است. نمودار سوم بیانگر تغییرات آهنگ جریان حجمی هوا با گذشت زمان می باشد.

۵-۲- بررسی عملکرد تطبیق پذیری کنترل پیشنهادی در این بخش عملکرد کنترل پیشنهادی در قبال تعقیب و تطبیق پذیری ورودی مرجع بررسی می شود. برای اینکار مطابق شکل ۲۳، یک ورودی پالس مربعی به عنوان ورودی مرجع دمای محفظه در نظر گرفته شده است. در شکل‌های ۲۳، ۲۴ و ۲۵ قابلیت تعقیب و تطبیق پذیری سیستم کنترل نسبت به ورودی مرجع دمای محفظه و تغییرات متغیرهای سیستم کنترل به منظور تامین خروجی مطلوب نشان داده شده است.

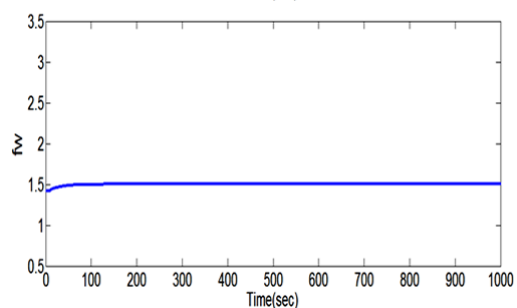
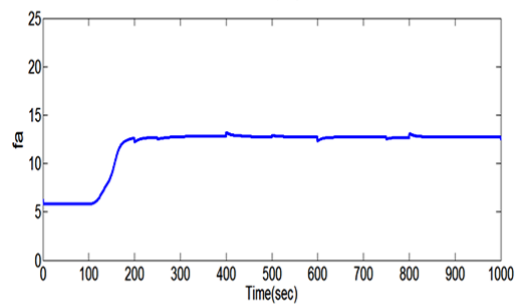
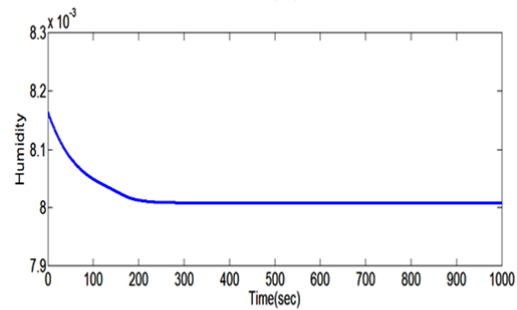
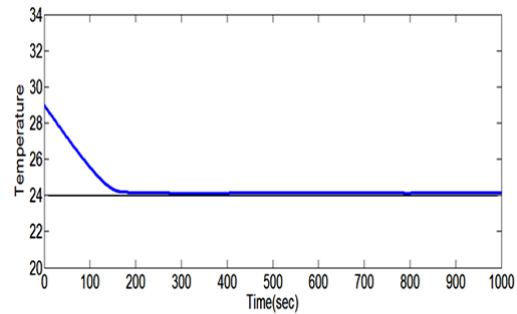


شکل ۲۳ - پاسخ دمایی سیستم تهویه جهت تعقیب ورودی مرجع دمای محفظه



شکل ۲۴ - پاسخ رطوبتی سیستم تهویه جهت تعقیب ورودی مرجع دمای محفظه

از آنجاییکه ورودی مطلوب تغییر یافته است، ضرایب بهره بوسیله روش اتوماتای یادگیری دوباره محاسبه می‌گردد. مطابق شکل ۲۵ متغیرهای کنترلی با تغییرات دما و رطوبت برای رسیدن به شرایط مطلوب تغییر می نمایند و پس از اینکه سیستم شرایط مطلوب را فراهم نمود به حالت پایدار می رسند. لازم به ذکر است که میزان تغییرات در آهنگ جریان هوا که به فن اصلی مربوط می‌شود، قابل ملاحظه است.



شکل ۲۲ - پاسخ نهایی سیستم تهویه در حضور اغتشاشات خارجی

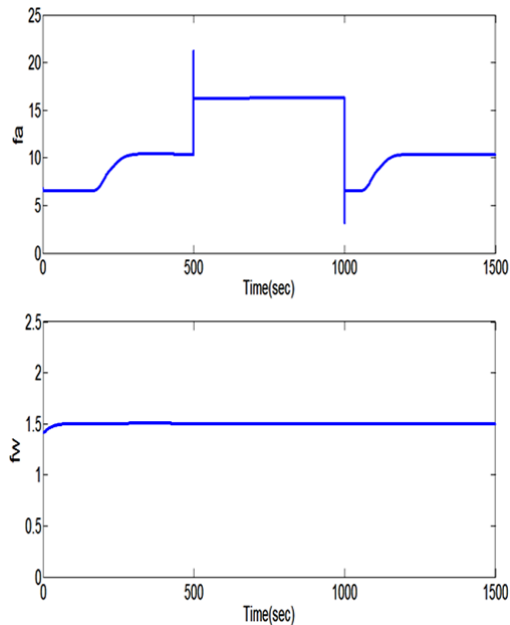
از شکل ۲۲ نتیجه می‌شود که کنترل پیشنهادی نه تنها در برابر اغتشاشات خارجی مقاوم است، بلکه عملکرد مناسبی نیز در تامین شرایط مطلوب حرارتی دارد و قادر است در مدت زمان مناسبی، شرایط خروجی موردنظر را فراهم نماید.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله، کنترل کننده‌ای ارائه گردید که در تأمین شرایط مطلوب محیطی، کاهش تلفات انرژی و حداقل سازی فرامین کنترلی بسیار توانمند است. نتایج شبیه‌سازی نظیر نوسانات بسیار کم پاسخ سیستم، زمان استقرار مناسب در تک تک بازه های دمایی و رطوبتی و همچنین پایداری و تطبیق پذیری مناسب آن، نشان دهنده عملکرد مناسب کنترل پیشنهادی می باشد. این کنترل کننده در تعقیب شرایط مطلوب با وجود اغتشاشات خارجی بسیار مناسب عمل می نماید و همانطور که از جدول ۵ ملاحظه می‌شود، پاسخ دمایی و رطوبتی سیستم در بازه گسترده ای کاملاً مورد قبول است.

مراجع

- [1] Imbabi MS (1990) Computer validation of scale model tests for building energy simulation. Int J Energy Res 14: 727-736.
- [2] Huaguang Z, Cai L (2002) Decentralized nonlinear adaptive control of an HVAC system. Part C. 493-498.
- [3] Hongli JLL, Cai W(2006) Model predictive control based on fuzzy linearization technique for HVAC systems temperature control. Proceedings of the 1st IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Singapore: 1-5.
- [4] Canbay CS, Hepbasli A, Gokcen G (2004) Evaluating performance indices of a shopping center and implementing HVAC control principles to minimize energy usage. Energy and Buildings 36: 587-598.
- [5] Harrold MV, Lush DM (1988) Automatic controls in building services. Proc Elect Power Appl 135: 105-133.
- [6] Huang S, Nelson RM (1991) A PID-law combining fuzzy controller for HVAC application. ASHRAE Trans: 768-774.
- [7] Geng G, Geary GM (1993) On performance and tuning of PID controllers in HVAC systems. Proceeding of the 2nd IEEE Conference on Control Applications.
- [8] Alcalá R, Benttez JM, Casillas J, Cordon O, Pérez R (2003) Fuzzy control of HVAC systems optimized by genetic algorithms. Applied Intelligence 18: 155-177.
- [9] Bi Q, Cai W (2000) Advanced controller auto-tuning and its application in HVAC systems. Control Engineering Practice 8: 633-644.
- [10] Gacto MJ, Alcalá R, Herrera F (2011) Evolutionary multi-objective algorithm to effectively improve the performance of the classic tuning of fuzzy logic controllers for a heating,



شکل ۲۵- تغییرات مربوط به آهنگ جریان هوا و آب سرد جهت تعقیب ورودی مرجع دمای محفظه

جدول ۵- دما و رطوبت قبل از اعمال کنترل کننده و پس از اعمال کنترل کننده پیشنهادی

| دمای اولیه محفظه حرارتی | رطوبت اولیه محفظه حرارتی | رطوبت نهایی محفظه حرارتی | دمای نهایی محفظه حرارتی |
|-------------------------|---------------------------------|--------------------------|-------------------------|
| °C | kg H ₂ O/ kg dry air | | °C |
| ۲۱ | ۰/۰۰۷۹۶۰ | ۰/۰۰۸۰۰۷۹ | ۲۴/۰۵۴ |
| ۲۲ | ۰/۰۰۷۹۸۴ | ۰/۰۰۸۰۰۷۹ | ۲۴/۰۳۸ |
| ۲۳ | ۰/۰۰۸۰۰۰۶ | ۰/۰۰۸۰۰۷۹ | ۲۴/۰۵۵ |
| ۲۴ | ۰/۰۰۸۰۳۸ | ۰/۰۰۸۰۰۷۸ | ۲۴/۰۷۷ |
| ۲۵ | ۰/۰۰۸۰۵۵ | ۰/۰۰۸۰۰۷۹ | ۲۴/۰۳۷ |
| ۲۶ | ۰/۰۰۸۰۷۵ | ۰/۰۰۸۰۰۷۹ | ۲۴/۰۱ |
| ۲۷ | ۰/۰۰۸۱۰۵ | ۰/۰۰۸۰۰۷۸ | ۲۴/۰۶۳ |
| ۲۸ | ۰/۰۰۸۱۳۵ | ۰/۰۰۸۰۰۷۸ | ۲۴/۰۷۴ |
| ۲۹ | ۰/۰۰۸۱۶۵ | ۰/۰۰۸۰۰۷۹ | ۲۴/۰۵۷ |
| ۳۰ | ۰/۰۰۸۱۹۹ | ۰/۰۰۸۰۰۷۸ | ۲۴/۰۶۸ |
| ۳۱ | ۰/۰۰۸۲۱۵ | ۰/۰۰۸۰۰۷۹ | ۲۴/۰۵ |
| ۳۲ | ۰/۰۰۸۲۴۵ | ۰/۰۰۸۰۰۷۸ | ۲۴/۰۸ |
| ۳۳ | ۰/۰۰۸۲۷۵ | ۰/۰۰۸۰۰۷۸ | ۲۴/۰۶ |
| ۳۴ | ۰/۰۰۸۲۹۵ | ۰/۰۰۸۰۰۷۸ | ۲۴/۰۸۸ |

- [۲۰] قره ویسی ع. ا. کاشکی م (۱۳۸۷) طراحی خودکار کنترل فازی تاکاگی سوگنو توسط روش ترکیبی یادگیری تقویتی گسسته و پیوسته. مجله کنترل: ۴۰-۴۸.
- [21] Mohammadi SMA, Gharaveisi A, Mashinchi M, Vaezi-Nejad SM (2008) Development of a novel reinforcement learning automata method for optimum design of proportional integral derivative controller for nonlinear systems. Proceedings of the World Congress on Engineering 3, WCE, London, U.K.
- [22] Arguello-Serrano B, Velez-Reyes M (1999) Nonlinear control of a heating, ventilating and air conditioning system with thermal load estimation. IEEE Trans Control Syst Technol 7: 56-63.
- [23] Hamdi M, Lachiver G (1998) A fuzzy control system based on the human sensation of thermal comfort. Proceeding of the IEEE International Conference, IEEE Computer Society, Washington DC, USA: 4-9.
- [24] Krakow KI, Lin S (1995) PI control of fan speed to maintain constant discharge pressure. ASHRAE Trans: 398-407.
- [۲۵] غفاری ع. موسوی نائینیان م، خدایاری ع ر (۱۳۸۶) مدلسازی و کنترل یک سیستم هواساز با استفاده از روش رگولاتور مربعی خطی در وضعیت تهویه مطبوع. پانزدهمین کنفرانس سالانه (بین المللی) مهندسی مکانیک.
- [26] Chi-Min C, Tai-Lang J, Yue-Wei H (2005) A study of thermal comfort control using least enthalpy estimator on HVAC system. American Control Conference.
- [27] Schumacher B, Bachmann G, Guebeli M (1998) Economiser tx2 [Air conditioning control algorithm]. Proceeding of the UKACC International Conference on Control, IEEE Computer Society, Washington DC, USA: 1711-1716.
- [28] Kluska J (2009) Analytical methods in fuzzy modeling and control (studies in fuzziness and soft computing). Springer Ltd.
- ventilating and air conditioning system. IEEE International Workshop on Genetic and Evolutionary Fuzzy Systems (GEFS): 73-80.
- [11] Nowak M, Urbaniak A (2011) Utilization of intelligent control algorithms for thermal comfort optimization and energy saving. IEEE Carpathian Control Conf (ICCC): 270-274.
- [12] Wang J, Zhang C, Jing Y (2008) Fuzzy immune self-tuning PID control of HVAC system. In Proc IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA: 678-683.
- [13] Hongli L, Peiyong D, Lei J (2008) A novel fuzzy controller design based-on PID gains for HVAC systems. In Proc World Congress on Intelligent Control and Automation: 736-739.
- [14] Arabinda KP (2008) Development of neuro-fuzzy controller for applications to HVAC system, inverted pendulum and other processes. Int J Computational Cognition 6: 1-6.
- [15] Soyguder, Alli H (2009) An expert system for the humidity and temperature control in HVAC systems using ANFIS and optimization with Fuzzy Modeling Approach. Energy and Buildings 41: 814-822.
- [16] Khooban MK, Soltanpour MR, Abadi DNM, Esfahani Z (2012) Optimal intelligent control for HVAC systems. Journal of Power Technologies 92(3): 192-200.
- [17] Cordon O, Herrera F, Hoffmann F, Magdalena L, Gomide F (2003) Ten years of genetic fuzzy systems: current framework and new trends. Fuzzy Sets Syst 141: 5-31.
- [18] Soltanpour MR, Khooban MH, (2013) Optimal fuzzy sliding mode control for tracking the robot manipulator in presence of uncertainties. Accepted for Publication in Journal of Nonlinear Dynamics.
- [19] Niknam T, Khooban MH, Soltanpour MR (2013) An optimal type II fuzzy sliding mode control design for a class of nonlinear systems. Accepted for Publication in Journal of Nonlinear Dynamics.